

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.001

宁夏银北灌区水盐均衡模型及其应用

余 美¹,芮孝芳²

(1.中国科学院南京土壤研究所,江苏 南京 210008;

2.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:根据质量守恒原理,建立了包气带和含水层的水盐均衡模型,并对宁夏银北各干渠灌域的土壤含盐量、地下水埋深和地下水矿化度的变化过程进行了模拟.在含水层水量均衡方程中,把潜水蒸发系数和给水度作为变参处理,考虑了相邻灌域间的潜流交换量.针对方程的非线性性质,提出了迭代求解方法.含水层盐量均衡方程中潜流的携盐量视其交换方向而定,与包气带盐量均衡方程联立构成方程组后,利用共轭梯度法求解.预测结果与实测数据对比表明,相对误差在 8% 以内,该模型可用于银北灌区的水盐动态预测.

关键词:土壤盐碱化 水盐均衡模型 土壤含盐量 地下水埋深 地下水矿化度 银北灌区

中图分类号: S27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)04-0367-06

盐碱化是当今世界土地荒漠化的主要类型之一.开展灌区水盐动态模拟研究,对制定盐碱化防治方案,合理利用水土资源,抑制农业生态恶化,提高土地生产能力,具有重要的现实意义.

灌区水盐动态变化和土壤盐碱化的产生,归根结底是水盐均衡问题.水盐动态变化是水盐均衡的外在表现,水均衡决定盐均衡.自 1930 年 Терапмог 提出利用水盐平衡法预报区域的水盐动态以来,Kaddah 等^[1-6]对宏观水盐平衡模型进行了不断的完善.但是,大部分模型将整个区域或流域视为一个系统,忽略了系统内横向(各分区之间)以及纵向(地表径流、土壤和地下水之间)的水分与盐分交换,因此,只能提供总体的水盐量信息,而不能反映水盐在水平和垂直方向上的分布特征.为此,本文以盐害较重的宁夏银北引黄灌区为研究实例,全面分析影响包气带和含水层中盐分迁移与积累的均衡项,建立了分区水盐均衡模型,对不同干渠灌域的土壤含盐量、地下水埋深和矿化度进行逐时段模拟,以期在改进传统水盐均衡模型的功能,提高其预测精度方面做出新的探索.

1 水盐均衡模型结构

银北灌区位于宁夏回族自治区的北部,土地面积 43.10 万 hm^2 ,灌溉面积 13.47 万 hm^2 .由于受气候、地形、土壤和灌溉排水状况的影响,水盐状态的空间分布差异较大,把银北灌区作为单一的整体来模拟显然不符合实际.因此,综合考虑引水、排水管理以及地下水埋深、土壤盐碱化程度等因素,把银北灌区按引水干渠渠系划分为 4 个灌域,即西干渠、唐徕渠、汉延渠和惠农渠灌域.

银北灌区的潜水水位动态主要受控于引黄灌溉、大气降水的入渗补给,而潜水蒸发、沟排和开采为其主要排泄途径.由于地下水埋深较浅、矿化度高,在强烈的蒸发条件下地下水通过土壤毛管上升至地表,并将其携带的盐分释放、累积于表土层,造成土壤次生盐碱化.据此积盐机理,本文从水盐在包气带和含水层间的转化关系入手,建立了如下分区水盐均衡模型.

2 水盐均衡方程

2.1 水量均衡方程

以一个典型灌域为例,含水层水量均衡方程如下:

$$-\mu_j F_j (H_{j,i+1} - H_{ji}) = 0.1 \alpha_{vj} P_{ji} F_j + \alpha_{vj} Q_{vji} + \alpha_{vj} (Q_{Yji} - Q_{Sji}) + \alpha_{wj} Q_{wji} +$$

收稿日期:2008-06-11

基金项目:国家自然科学基金(40771097)

作者简介:余美(1976—),女,湖南华容人,博士后,主要从事水文学及水资源研究.

$$Q_{Gji} + Q_{Bji} + Q_{Lji} + Q_{Mji} - Q_{Rji} - Q_{Wji} - D_{ji} - Q_{Dji} - Q_{Fji} - W_{Eji} - R_{Sji} \quad (1)$$

式中: μ_j —— j 灌域给水度; F_j —— j 灌域含水层面积, km^2 ; $H_{ji}, H_{j,i+1}$ —— j 灌域 i 时刻、 $i+1$ 时刻地下水埋深, cm ; $\alpha_{pj}, \alpha_{vj}, \alpha_{Yj}, \alpha_{Wj}$ —— j 灌域降雨入渗、地表径流入渗、引黄渠灌水入渗、井灌水回归补给系数; P_{ji} —— j 灌域 i 时段降雨量, mm ; Q_{Vji} —— j 灌域 i 时段贺兰山山前地表径流量, 万 m^3 ; Q_{Yji} —— j 灌域 i 时段引黄水量, 万 m^3 ; Q_{Sji} —— j 灌域 i 时段地表洗盐排水量, 万 m^3 ; Q_{Wji} —— j 灌域 i 时段井灌水量, 万 m^3 ; Q_{Gji} —— j 灌域 i 时段贺兰山山前潜流侧向补给量, 万 m^3 ; Q_{Bji} —— j 灌域 i 时段黄河侧渗补给量, 万 m^3 ; Q_{Lji}, Q_{Rji} —— j 灌域 i 时段潜流进入量和流出量, 万 m^3 ; D_{ji} —— j 灌域 i 时段城市农村生活及工业用水量, 万 m^3 ; Q_{Dji} —— j 灌域 i 时段机井排水量, 万 m^3 ; Q_{Fji} —— j 灌域 i 时段排水沟排泄地下水量, 万 m^3 ; W_{Eji} —— j 灌域 i 时段潜水蒸发量, 万 m^3 ; Q_{Mji} —— j 灌域融冻期 i 时段封冻层融化后对地下水的补给量, 万 m^3 ; R_{Sji} —— j 灌域 i 时段越流排泄量, 万 m^3 .

2.2 盐量均衡方程

2.2.1 包气带盐量均衡方程

$$H_{j,i+1} F_j \rho_j C_{Aj,i+1} - H_{ji} F_j \rho_j C_{Aji} = 10^{-4} F_j P_{ji} C_{Pi} + 10^{-3} (Q_{Vji} C_{Vi} + Q_{Yji} C_{Yi}) + 10^{-3} (Q_{Wji} + W_{Eji}) (C_{Wj,i+1} + C_{Wji}) / 2 - 10^{-3} (Q_{Sji} C_{Sji} + Q_{Nji} C_{Nji}) - V_{Sji} \quad (2)$$

式中: ρ_j —— j 灌域土壤干密度, g/cm^3 ; $C_{Aji}, C_{Aj,i+1}$ —— j 灌域 i 时刻、 $i+1$ 时刻包气带含盐量, %; C_{Pi}, C_{Vi}, C_{Yi} —— i 时段降水、地表径流及黄河水的矿化度, g/L ; $C_{Wji}, C_{Wj,i+1}$ —— j 灌域 i 时刻、 $i+1$ 时刻地下水的矿化度, g/L ; Q_{Nji} —— j 灌域 i 时段淋盐水量, 万 m^3 ; C_{Nji} —— j 灌域 i 时段淋盐水矿化度, g/L ; C_{Sji} —— j 灌域 i 时段洗盐水矿化度, g/L ; V_{Sji} —— j 灌域 i 时段作物吸盐量, 万 t .

2.2.2 含水层盐量均衡方程

$$(H_{Dj} - H_{j,i+1}) F_j n_j C_{Wj,i+1} - (H_{Dj} - H_{ji}) F_j n_j C_{Wji} = C_{Nji} Q_{Nji} + C_{Gi} Q_{Gji} + C_{Bi} Q_{Bji} + Q_{Lji} (C_{Wj-1,i+1} + C_{Wj-1,i}) / 2 - (W_{Eji} + Q_{Fji} + D_{ji} + Q_{Wji} + Q_{Dji} + Q_{Rji} - R_{Sji}) (C_{Wj,i+1} + C_{Wji}) / 2 \quad (3)$$

式中: H_{Dj} —— j 灌域含水层底板距地表的埋深, cm ; $C_{Wj-1,i}, C_{Wj-1,i+1}$ —— $j-1$ 灌域 i 时刻、 $i+1$ 时刻地下水的矿化度, g/L ; n_j —— j 灌域土壤孔隙率; C_{Gi}, C_{Bi} —— i 时段山前潜流和黄河侧渗补给水量的矿化度, g/L .

3 参数率定

利用银北灌区 1980~1999 年的实测资料,确定模型参数的取值.

a. 给水度 μ 、渗透系数 K . 为了区别于传统给水度,称随地下水埋深变化的给水度为给水系数或变值给水度^[7]. 对于均质岩土,地下水埋深在 0 到岩土中毛管最大上升高度范围内变化时,给水系数随地下水埋深的增大而增大,最后趋向于常值给水度. 为提高模拟精度,选用宁夏水利科学研究所位于银川市南梁农场和平罗县东风试验站的抽水试验资料,确定了银北灌区的变值给水度,即: $\mu = 0.037 H^{1.009}$, $0 < H < 1.18 \text{ m}$; $\mu(H) = 0.045$, $H \geq 1.18 \text{ m}$,为常值给水度. 含水层渗透系数采用地质部门的勘测值 15 m/d .

b. 潜水蒸发系数 C . 根据地下水位长期观测井资料,由动态分析法得到 $C \sim H$ 关系. 选取公式 $C = a e^{-bH}$ 拟合曲线^[8],得到变值潜水蒸发系数 $C = 0.726 e^{-1.299H}$.

c. 降水入渗补给系数 α_p 、地表径流入渗补给系数 α_Y . 银北灌区存在冻土期,冻结期为当年 11 月 1 日至翌年 3 月 31 日. 冻土层将地下水与地表的大气隔开,致使冻土期的降雨量无法入渗而全部消耗于蒸发. 因此,在统计入渗补给地下水的降雨量时,仅选取非冻土期 4 月 1 日至 10 月 31 日的降雨量. 由动态分析法确定出银北灌区的降水入渗补给系数为 0.12. 据 2001 年宁夏地下水资源评价结果^[9],山前地表径流入渗补给系数取为 0.7.

d. 渠灌入渗补给系数 α_Y 、井灌回归补给系数 α_W . 采用动态分析法,并结合东风试验区灌溉入渗试验^[10],确定银北灌区的渠灌入渗补给系数为 0.23,井灌回归补给系数为 0.1.

e. 排水沟排泄地下水系数 α_D 、地表排水系数 α_S . 银北灌区的排水沟在灌溉期 5~11 月除排泄地下水外,还接纳田间排水、渠道退水、机井排水,间有雨洪加入. 非灌溉期为当年 12 月至翌年 5 月,基本上无地表产流,此时排水沟的排水量几乎全部由地下水侧渗排出. 因此,依据非灌溉期地下水埋深和排水沟排水量的实测资料,按下式计算:

$$\alpha_D = Q_F [\mu F (h_C - H)]^{-1} \quad \alpha_S = Q_S / Q_Y \quad (4)$$

式中： Q_F ——非灌溉期排水沟的排水量，万 m^3 ； H ——非灌溉期平均地下水埋深，cm； h_C ——排水沟深度，cm，银北灌区排水农沟、斗沟、支沟、干沟的深度一般为 1.5 m，1.8 m，2.5 m 和 4.5 m。综合水文分割法的计算结果^[9]，排水沟排泄地下水系数取为 0.25。从灌溉期的排水量中扣除地下排水部分即为地表排水，故依据灌溉期的实测引黄水量及排水量确定的地表排水系数为 0.33。

f. 降水矿化度 C_P 、黄河水矿化度 C_Y 、贺兰山地表径流矿化度 C_V 。降水矿化度为 0.03 g/L。黄河流经青铜峡水库坝下多年平均矿化度为 0.441 g/L。贺兰山东麓的主要沟谷有大水沟、汝箕沟、大风沟和大武口沟等，多年平均矿化度为 0.33 g/L。

g. 洗盐水矿化度 C_S 。

$$\begin{cases} C_{Sji} = C_{Oji} + K_{Sj} [10^3 \rho_j 0.5 (C_{Aj,i+1} + C_{Aji}) - C_{Oji}] \\ C_{Oji} = \frac{0.1 C_{Pi} P_{ji} F_j + C_{Yi} Q_{Yji} + C_{Vi} Q_{Vji} + 0.5 (C_{Wj,i+1} + C_{Wji}) Q_{Wji}}{0.1 P_{ji} F_j + Q_{Yji} + Q_{Vji} + Q_{Wji}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： C_{Oji} —— j 灌域 i 时段洗盐水的初始矿化度，g/L； K_{Sj} ——洗盐效率，根据实测的包气带土壤含盐量 C_{Aji} 和洗盐排水矿化度 C_{Sji} ，按式(5)反求 K_{Sj} ，得 $K_{Sj} = 0.58$ 。

h. 淋盐水矿化度 C_N 。

$$\begin{cases} C_{Nji} = C_{Oji} + K_{Gj} [10^3 \rho_j 0.5 (C_{Aj,i+1} + C_{Aji}) - C_{Oji}] \\ C_{Oji} = \frac{0.1 C_{Pi} \alpha_{Pj} P_{ji} F_j + C_{Yi} \alpha_{Yj} (Q_{Yji} - Q_{Sji}) + C_{Vi} \alpha_{Vj} Q_{Vji} + 0.5 (C_{Wj,i+1} + C_{Wji}) \alpha_{Wj} Q_{Wji}}{Q_{Nji}} \end{cases} \quad (6)$$

$$Q_{Nji} = 0.1 \alpha_{Pj} F_j P_{ji} + \alpha_{Yj} (Q_{Yji} - Q_{Sji}) + \alpha_{Vj} Q_{Vji} + \alpha_{Wj} Q_{Wji} \quad (7)$$

式中： C_{Oji} —— j 灌域 i 时段淋盐水的初始矿化度，g/L； K_{Gj} ——淋盐效率。地下水补给水量携带的盐分与地下水消耗带走的盐分之差为地下水的积盐量。根据实测资料和有关参数，可计算出地下水的总补给量、消耗量以及地下水积盐量，然后利用式(3)和式(6)反求 K_{Gj} ，得 $K_{Gj} = 0.41$ 。

i. 土壤干密度 ρ 、土壤孔隙率 n 。银北灌区大部分土层为相对均一的砂壤土，干密度为 1.506 g/cm³，土壤孔隙率为 0.43。

4 模型求解

4.1 水盐均衡项计算

a. 潜水蒸发量 W_{Eji} 。

$$W_{Eji} = 0.1 C_j E_{ji} A_j \quad (8)$$

式中： E_{ji} ——水面蒸发量，mm； A_j ——潜水蒸发计算面积，km²。

b. 相邻灌域潜流侧渗量 Q_{Rji} 。根据银北灌区地下水位等值线分析，地下潜流顺地形呈西南至东北流向，沿灌域分界线引 3 个断面，按达西公式计算：

$$Q_{Rji} = 0.1 S_j K_j \sin \alpha_j T_i (Z_{ji} - Z_{j+1,i}) / L_j \quad Q_{Lj+1,i} = Q_{Rji} \quad (9)$$

式中： S_j —— j 灌域与 $j+1$ 灌域之间的过水断面面积，km²； K_j ——渗透系数，m/d； α_j ——流向与过水断面之间的夹角； Z_{ji} ， $Z_{j+1,i}$ —— j 灌域、 $j+1$ 灌域 i 时段平均地下水位，m， $Z_{ji} = Z_{0j} - (H_{ji} + H_{j,i+1})/2$ ， Z_{0j} 为 j 灌域平均地面高程； L_j ——相邻灌域的几何中心间距，km； T_i ——时段长，d。

c. 排水沟排泄地下水量 Q_{Fji} 、地表洗盐排水量 Q_{Sji} 。

$$Q_{Fji} = \max \{0, \alpha_{Dji} \mu_j F_j (h_{Cj} - H_{ji})\} \quad Q_{Sji} = \alpha_{Sj} Q_{Yji} \quad (10)$$

d. 贺兰山山前潜流补给量 Q_{Gji} 、山前地表径流量 Q_{Vji} 。贺兰山潜流补给西干渠和唐徕渠灌域的水量由断面法计算：

$$Q_{Gji} = 0.1 H_a L_j K_j I T_i \quad (11)$$

式中： H_a ——单位长度过水断面面积，m²/m，即含水层厚度； L_j ——计算长度，km； I ——垂直于断面的水力坡度，由地下水等水位线图量算。据文献^[11]，由贺兰山流入银北灌区的多年平均地表径流量为 0.196 亿 m³/a。依所选研究年的降雨在时段间的分配比例，估算山前地表径流的时段值。

e. 黄河侧渗补给量 Q_{Bji} 、越流排泄量 R_{Sji} 。因地下水与黄河间的补排关系仅发生在第 5 排水沟以东地区，而在第 5 排水沟以西的广大平罗地区地下水与黄河不发生直接的水力联系^[12]，故在均衡方程中剔除此

项. 据文献[11], 银北灌区潜水层越流排泄地下水量为 1.23 亿 m^3/a , 时段越流排泄量按该值在时段间平均分配来估算.

f. 城市、农村生活及工业用水量 D_{ji} 、封冻层融化对地下水的补给量 Q_{Mji} . 银北灌区工业、城镇生活和农村人畜用水主要利用深层地下水, 只有不足 5% 的需水量由浅层地下水供给. 工业用水量按万元产值用水量与工业产值的乘积推算, 城镇和农村人畜用水量按人均定额和人口的乘积推算. 因缺乏冻土期的潜水蒸发量以及融冻期的地下水实测资料, 难以确定封冻层融化后对地下水的补给量, 故暂不考虑此项.

g. 作物吸盐量 V_s . 作物生长吸收盐分, 并随着作物的收获把盐从土壤中析出. 根据前苏联学者 K. П. 帕克和内蒙古水利科学研究所的试验成果[13], 对植物体吸盐量进行粗算, 春小麦吸盐量为 $350 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 玉米吸盐量为 $430 \text{ kg}/\text{hm}^2$.

4.2 方程组求解

在已知地下水初始埋深的情况下, 将各灌域的含水层水量均衡方程联立构成方程组. 由于该方程组含有非线性项, 采用迭代方法求解. 即先不考虑相邻灌域间的潜水量交换, 据式(1)计算各灌域的地下水埋深, 然后由式(9)计算交换量, 将此交换量代入式(1)重新计算, 依此类推直至收敛, 便可获得各灌域不同时刻地下水埋深 H_{ji} 的模拟值.

含水层盐量均衡方程式(3)只适用于 $Q_{Lji} \geq 0$ 且 $Q_{Rji} \geq 0$ 的情况, 而实际上任意灌域与其相邻灌域间潜流交换量的方向随其地下水位而变, 因此, 通过潜流交换的矿化度也不同. 计算时先以水量均衡计算结果为基础, 根据潜流交换量 Q_{Lji} 和 Q_{Rji} 的正负, 改变式(3)中其前所乘系数. 在已知土壤初始含盐量 C_{Aji} 及地下水初始矿化度 C_{Wji} 的情况下, 所有灌域逐时段联立式(2)和式(3), 构成稀疏系数矩阵的高阶线性方程组. 利用共轭梯度法 CG(conjugate gradient) 求解, 可得各灌域不同时刻土壤含盐量 C_{Aji} 及地下水矿化度 C_{Wji} 的模拟值.

5 模型应用

选取 2000 年的实测数据进行检验. 模拟时段为月, 开始时刻为 1 月初, 结束时刻为 12 月底.

5.1 水动态模拟

各灌域地下水埋深的逐月模拟结果见图 1, 年均值见表 1.

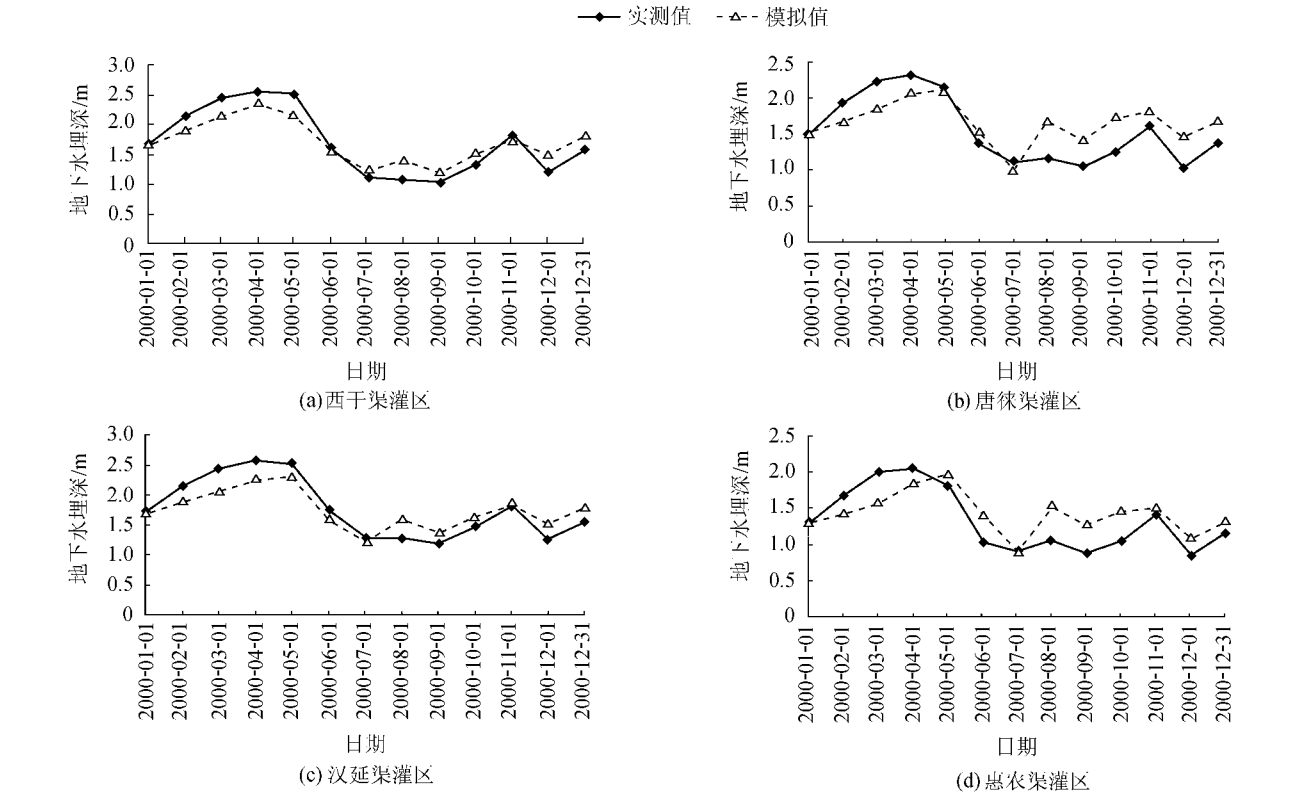


图 1 地下水埋深实测值与模拟值对比

Fig. 1 Comparison between measured and simulated groundwater depths

5.2 盐动态模拟

由于宁夏银北灌区仅在土壤盐渍化普查年份抽样测定灌前土壤含盐量,因此选择数据连续性较好的地下水矿化度作为比较指标.筛选出反映灌域主体值的观测井资料,并对缺测的 1 月、6~9 月地下水矿化度进行经验插值.各灌域地下水矿化度的逐月模拟结果见图 2,各灌域均值见表 2.

5.3 结果分析

从计算结果可以看出,地下水埋深和矿化度的模拟值与实

表 1 年平均地下水埋深模拟误差

Table 1 Simulation error of annual average groundwater depths			
灌域	实测值/m	计算值/m	相对误差/%
西干渠	1.70	1.70	0
唐徕渠	1.55	1.66	7
汉延渠	1.80	1.78	-1
惠农渠	1.37	1.48	8
银北灌区	1.61	1.66	3

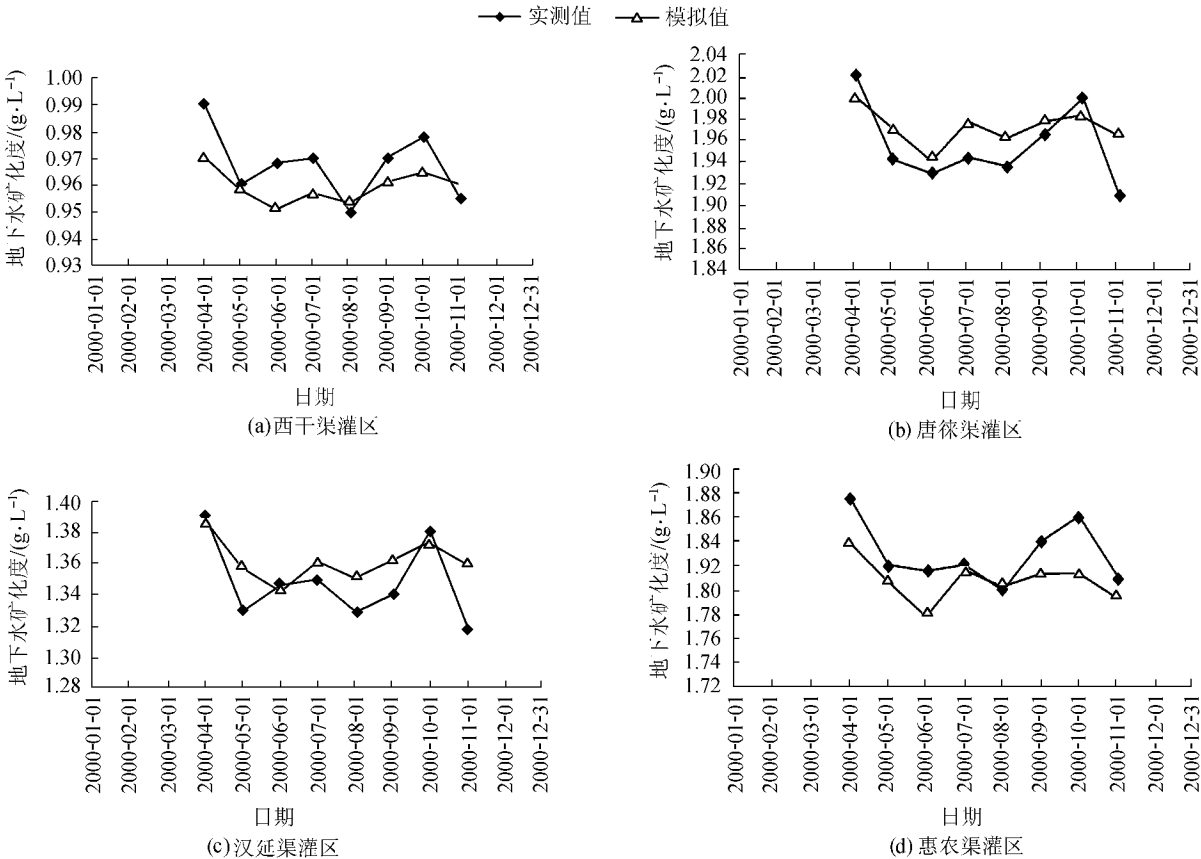


图 2 地下水矿化度实测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison between measured and simulated groundwater mineralizations

测值比较吻合,整个模拟过程也基本反映了水盐的实际变化趋势,说明所建模型和参数可用于银北地区的水盐动态预测.引起误差的主要原因有:(a)由于收集到的灌区地下水动态观测资料和气象资料有限,无法选择足够多的代表性观测井以分别确定不同灌域的水文地质参数.(b)降雨入渗补给系数和灌溉入渗补给系数并非常数,前者随雨量、地下水埋深而变化,后者因灌水定额、地下水埋深而不同.由于缺乏地下水观测资料和灌溉试验资料,无法确定水文地质参数与其影响因素之间的统计关系,以常值代替变值,势必会影响模拟的精度.(c)银北灌区最大冻土层厚达 1 m,其冰期和非冰期的潜水蒸发特性有很大区别.若观测资料充足,应分别确定冰期和非冰期的潜水蒸发系数.此外,因封冻层融化后对地下水的补给量较难确定,在水量平衡中暂未计入.(d)没有考虑施用化肥引入的盐量、黄河与黄河漫滩地带间的水盐交换,以及因地下水位升降引起的盐量变化.此外,数据观测的准确性和资料筛选的主观倾向性,也对计算参数的确定产生一定影响.

表 2 灌溉期平均地下水矿化度模拟误差

Table 2 Simulation error of average groundwater mineralizations during irrigation period			
灌域	实测值/ (g·L ⁻¹)	计算值/ (g·L ⁻¹)	相对 误差/%
西干渠	0.97	0.96	-1
唐徕渠	1.96	1.97	1
汉延渠	1.35	1.36	1
惠农渠	1.83	1.81	-1
银北灌区	1.53	1.53	0

6 结 论

与以往的区域水盐均衡模型相比,本文在以下几方面进行了完善:

- a. 考虑区域内各子区间的水盐交换,从水盐在包气带和含水层间的转化关系入手,建立了分区水盐均衡模型,对反映灌区盐化程度的3个评价指标,即土壤含盐量、地下水埋深和地下水矿化度进行了模拟。
- b. 考虑相邻灌域间的潜流交换量,并针对地下含水层水量均衡方程的非线性性质,提出了迭代求解方法。根据相邻灌域间潜流的交换方向,确定含水层盐量均衡方程中潜流交换量的矿化度系数,与土壤盐量均衡方程联立形成方程组后,采用共轭梯度法求解。
- c. 把潜水蒸发系数和给水度作为变参处理,并考虑了作物吸盐量对水盐状态的影响。

参考文献:

- [1] KADDAH M T, RHOADES J D. Water and salt balance in imperial valley, California[J]. Soil Sci Soc Amer J, 1976, 40(1): 93-100.
- [2] YOU W R, MENG F H. Salt-water dynamics in soils: II. Effect of precipitation on salt-water dynamics[J]. Pedosphere, 1992, 2(2): 289-306.
- [3] 石元春, 李保国, 李韵珠, 等. 区域水盐运动监测预报[M]. 北京: 科学技术出版社, 1991.
- [4] 陈喜. 引黄灌区盐碱化预测模型[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 92-96.
- [5] 姜卉芳, 董新光, 郭西万, 等. 新疆焉耆盆地水盐平衡模型的率定与检验[J]. 灌溉排水, 2000, 19(1): 78-80.
- [6] 胡安焱, 高瑾, 贺屹, 等. 干旱内陆灌区土壤水盐模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 726-729.
- [7] 高正夏, 谷江波, 徐军海. 宁夏青铜峡河西灌区水文及水文地质参数研究[J]. 水资源保护, 2003(2): 14-16, 38.
- [8] 张学英. 潜水蒸发与土质及地下水埋深关系[J]. 地下水, 2002, 24(1): 8-9.
- [9] 张黎, 王利. 宁夏地下水资源[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2003.
- [10] 杜历, 鲍子云. 银北灌区地下水调控试验示范研究[J]. 西北水资源与水工程, 1995, 6(3): 77-83.
- [11] 宁夏回族自治区水文水资源勘测局. 西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究: 宁夏回族自治区水资源评价[R]. 银川: 宁夏回族自治区水文水资源勘测局, 1999.
- [12] 施鑫源, 陈喜, 刘玉龙, 等. 银北平罗地区含水层参数率定模型[J]. 水文, 1994, 25(11): 38-41.
- [13] 汪林, 甘泓, 汪珊, 等. 宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

Application of water and salt balance model in Yinbei irrigation district of Ningxia

YU Mei¹, RUI Xiao-fang²

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the principle of mass conservation, water and salt balance models for aeration zones and aquifers were established and employed to simulate the variation of soil salt content, groundwater depth and mineralization in the irrigation areas of each canal in the Yinbei irrigation district of Ningxia. In the water balance equation for aquifers, the evaporation coefficient and the specific yield of phreatic water were treated as the variable parameters, and the subsurface exchange flows between the adjacent irrigation areas were considered. An iteration method was proposed with regard to the nonlinearity of the equation. In the salt balance equation for aquifers, the amount of salt carried by the subsurface flows was determined based on their exchange directions. The simultaneous equations of the salt balance between the aquifers and the aeration zones were solved with the conjugate gradient method. Comparison between the simulated results and measured data shows that the relative error is smaller than 8%, and the present models can be applied to the prediction of the water and salt variation the Yinbei irrigation district.

Key words: soil salinization; water and salt balance model; soil salt content; groundwater depth; groundwater mineralization; Yinbei irrigation district